

SIMULAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA DO FORJAMENTO DE UMA RODA ¹

Anderson Avelar de Paula ²

Antônio Ribeiro Rodrigues ³

Gilmar Cordeiro da Silva ⁴

Tarcísio José de Almeida ⁴

Maria Teresa Paulino Aguiar ⁵

Haroldo Béria Campos ⁶

Antônio Eustáquio de Melo Pertence ⁶

Paulo Roberto Cetlin ⁷

Resumo

O objetivo do presente artigo é o estudo do processo de conformação por forjamento de uma roda metálica utilizada em equipamentos industriais através da simulação física utilizando-se como material modelo o chumbo com geometria 12 vezes menor que o tamanho real da roda e a simulação numérica pelo método de elementos finitos com o software comercial Deform 2D. As matrizes foram desenvolvidas pelo processo de usinagem por comando numérico. Observou-se que as cargas máximas e as geometrias finais das peças conformadas obtidas na simulação física apresentaram concordância com as cargas obtidas na simulação numérica. Uma peça de alumínio foi usinada até a forma final da roda para efeito de comparação entre a peça forjada final devido às dificuldades encontradas na usinagem com chumbo.

Palavras-chave: Forjamento; Simulação física; Material modelo; Método de elementos finitos.

PHYSICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE FORGING PROCESS OF A WHEEL BLANK

Abstract

The objective of the present paper is the study of the forging of an industrial wheel blank through the physical simulation utilizing lead as model material, but with a geometry 12 times smaller than the real size, and through the numerical simulation employing the finite element commercial software DEFORM 2D. The forging dies for the physical simulation were manufactured through numerically controlled machining. It was observed that the experimental and numerically predicted maximum loads and final geometries were in agreement. An aluminum part was machined with the wheel final dimensions for comparison with the final forged part, since lead machining proved to be difficult.

Key words: Forging process; Physical simulation; Model material; Finite elements method.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Eng. Mecânico, atualmente na EMBRAER – São José dos Campos, SP.*

³ *Discente do Curso de Engenharia Mecânica da UFMG.*

⁴ *Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas.*

⁵ *Profa. Associada do Depto. Eng. de Materiais e da Construção Civil da UFMG.*

⁶ *Prof. Associado do Depto. de Eng. Mecânica da UFMG.*

⁷ *Prof. Titular do Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais da UFMG*

1 INTRODUÇÃO

A conformação mecânica dos metais é uma área de grande importância na produção de bens de consumo. Ela compreende vários processos, nos quais as peças são produzidas através de deformações plásticas, provocando variações de forma e das dimensões nos metais, através da aplicação de esforços mecânicos externos. Alguns desses processos básicos são: laminação, trefilação, extrusão, forjamento e a estampagem, com possíveis variações de cada um.^(1,2)

O forjamento, em particular, é possivelmente a operação mais antiga de conformação mecânica e consiste em deformar um metal através de prensagem ou martelamento até que ele adquira as formas finais. Para isso, geralmente se utilizam matrizes de aços especiais, resistentes ao calor e a grandes esforços, cuja forma é a geometria final desejada para a peça. É também comum o forjamento de metais a altas temperaturas, pois isso reduz as cargas necessárias no processo.⁽³⁻⁵⁾

No presente artigo é feito um estudo do processo de conformação por forjamento de uma roda metálica utilizada em equipamentos industriais através da simulação física utilizando-se como material modelo o chumbo com geometria 12 vezes menor que o tamanho real da roda (devido à capacidade de carga da prensa) e a simulação numérica pelo método de elementos finitos, utilizando-se com o software comercial DEFORM 2D. Utilizou-se a mesma geometria da simulação física, para comparar os resultados das duas abordagens. Por ser uma peça com simetria, utilizou-se a metade da geometria e adotou-se um modelo axissimétrico. Foi feita a comparação de cargas máximas e geometrias finais das peças conformadas. As matrizes foram desenvolvidas pelo processo de usinagem por comando numérico.⁽⁶⁾

Observou-se que as cargas máximas e as geometrias finais das peças conformadas obtidas na simulação física apresentaram concordância com as cargas obtidas na simulação numérica. Uma peça de alumínio foi usinada até a forma final da roda para efeito de comparação entre a peça forjada final, devido às dificuldades encontradas na usinagem com chumbo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto das matrizes foi desenvolvido num tamanho 12 vezes menor utilizando-se o software AutoCAD 2000[®] considerando-se as características da geometria original da roda.

Para se escolher o material a ser adotado na fabricação utilizou-se o software acadêmico para seleção de materiais CES Selector 4.1[®], o qual apresenta as propriedades dos vários materiais. Adotou-se o aço ferramenta para fabricação de matrizes AISI D3, cujas características mecânicas são apresentadas na Tabela 1. Esse material é fornecido pela Villares, sendo o seu nome comercial VC130. As dimensões das matrizes superior e inferior são apresentadas nas Figuras 1.⁽⁷⁾

A fabricação das matrizes foi feita em conjunto no Laboratório de Projetos Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica / UFMG e a Brasição instalada no município de Juatuba. A usinagem das matrizes foi feita utilizando a fresadora CNC como indicada na Figura 2, sendo que o acabamento final e tratamento térmico por têmpera seguida de revenimento para alívio de tensões foram realizados nas instalações da Brasição.

As matrizes forma desenvolvidas para encaixarem em bases adaptáveis na máquina de ensaio do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica / UFMG como indica a Figura 3.

Tabela 1 Propriedades mecânicas do AISI D3: CES Selector 4.1®

Propriedade	Valor	Unidade
Tensão de Compressão	1864-2289	MPa
Limite Elástico	1864-2289	MPa
Limite de Resistência	2100-2502	MPa
Dureza Vickers	580-640	MPa

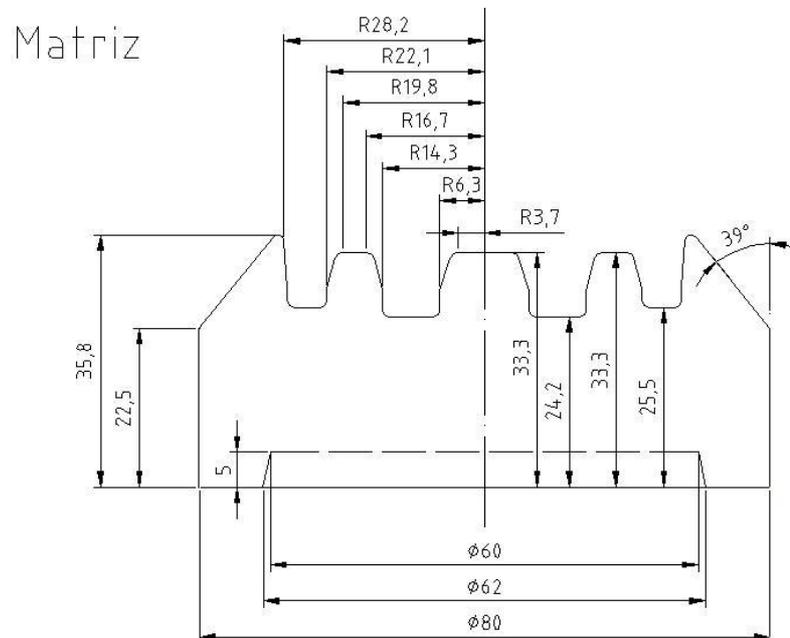


Figura 1. Dimensões das matrizes superior e inferior

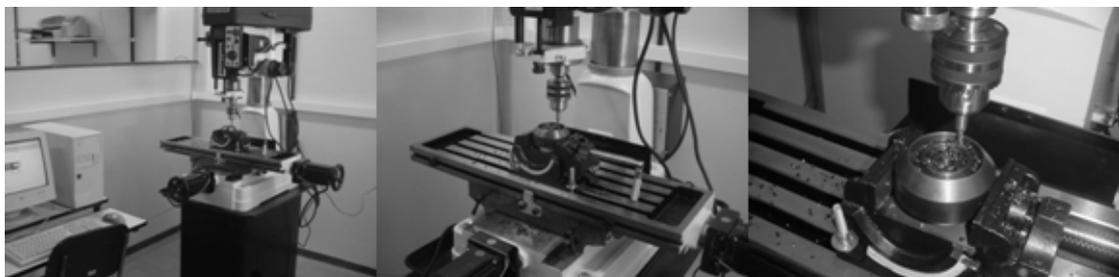


Figura 2. Processo de usinagem das matrizes na fresadora CNC.

Para o desenvolvimento da simulação numérica do forjamento da roda metálica utilizou-se a curva de fluxo do chumbo obtida experimentalmente, à temperatura ambiente, através de um ensaio de compressão em uma máquina Instron. Essa curva foi inserida no software e corresponde a uma taxa de deformação média de aproximadamente 0,001/s. Os pontos da curva utilizada no software podem ser vistos na Figura 4.^(8,9)

O chumbo foi utilizado como material modelo na simulação física. Foram forjados dois discos usinados nas dimensões $\varnothing 56 \times 18,5\text{mm}$. Como não foi possível encontrar no comércio tais medidas, partiu-se de uma barra de dimensões adequadas (material com estrutura bruta de fusão). As operações de forjamento foram feitas sem utilização de lubrificação de forma correspondente com a simulação computacional.⁽¹⁰⁾

Para obtenção dos discos na simulação física, os mesmos foram inicialmente cortados com espessura maior que o necessário (37 mm). O material foi então

comprimido para uma altura de 22 mm. Utilizou-se grafite para lubrificar os contatos entre o disco e os suportes. Após esse passe, que refinou a estrutura bruta de fusão, foi feita a usinagem até as dimensões finais. As massas dos dois discos foram respectivamente 509 gramas e 515 gramas. Os testes foram feitos em uma máquina de compressão Kratos de capacidade máxima igual a 500 KN.

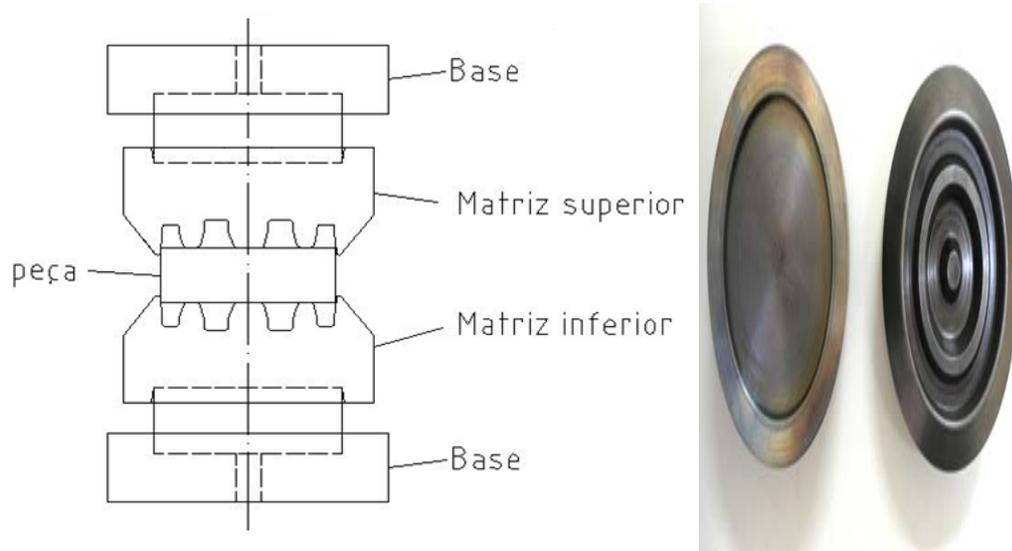


Figura 3. Desenvolvimento das matrizes para adaptação em máquina de ensaio.

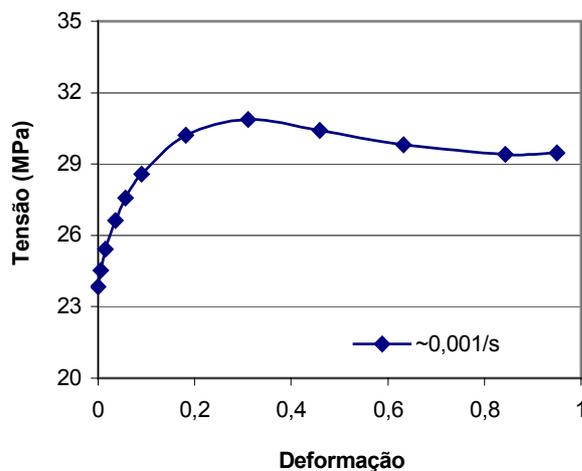


Figura 4. Curva do chumbo utilizada na simulação numérica.

Na montagem a matriz inferior encaixava-se no suporte dessa máquina, o qual possui um disco de aço escamoteável no seu centro que serve como posicionador da matriz. A matriz superior encaixava-se no punção, que possuía o mesmo diâmetro do disco da mesma forma que a matriz inferior no suporte. A ponta do punção deveria ser retirada para que isso seja possível. A Figura 5 ilustra a montagem utilizada.

Nas simulações o punção deveria descer 11,2 mm, aproximadamente. Para marcar essa distância, fez-se um risco com tinta no punção da Kratos a 11,2mm da superfície da guia do suporte. Quando essa marca é alcançada por essa superfície, pára-se o forjamento. Depois de iniciada a operação é importante que o processo seja realizado lentamente para evitar aumentos bruscos de carga na máquina. A

Figura 6 indica a posição inicial do teste onde se verifica a ausência de folgas verticais entre a matriz superior e o disco.

Uma peça de alumínio foi usinada até a forma final da roda para efeito de comparação entre a peça forjada final devido às dificuldades encontradas na usinagem com chumbo.

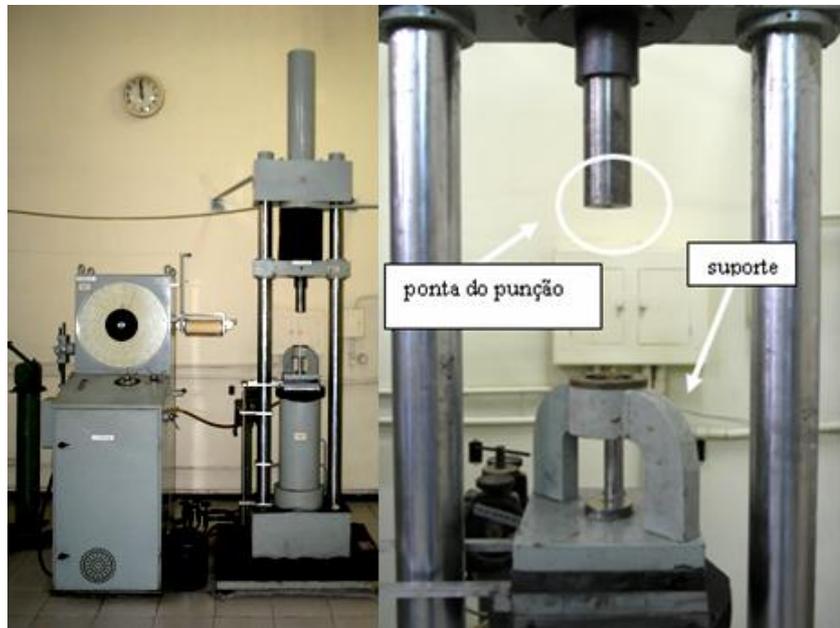


Figura 5. Montagem utilizada para a simulação física do chumbo.



Figura 6. Posição inicial do teste: ausência de folgas verticais entre a matriz superior e o disco.

3 RESULTADOS

A carga vertical obtida na simulação numérica para a peça de chumbo considerando-se matrizes feitas de material rígido é indicada na Figura 7, juntamente com a geometria deformada final. A carga máxima foi de aproximadamente 113 kN.

A Figura 8 mostra o disco usinado e uma peça forjada final obtida na simulação física. A Tabela 2 indica os valores obtidos para as cargas verticais máximas na simulação do forjamento do chumbo. As figuras 9 e 10 ilustram respectivamente as dimensões da roda e a comparação entre a forma final da roda produzida em alumínio e a peça final forjada de chumbo.

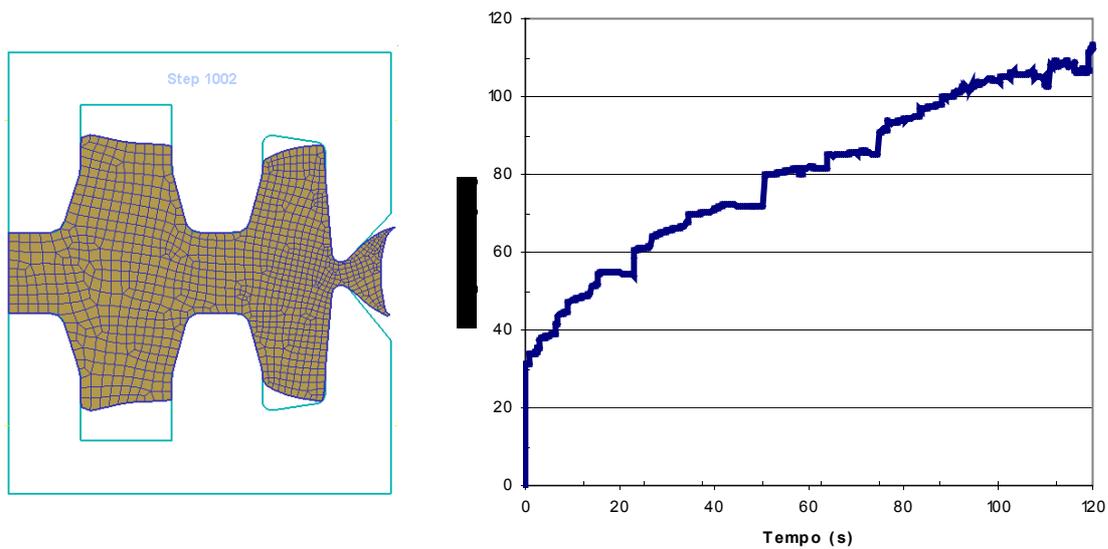


Figura 7. Geometria final deformada e curva de carga na direção vertical para a matriz 12 x menor considerando o material modelo Pb.

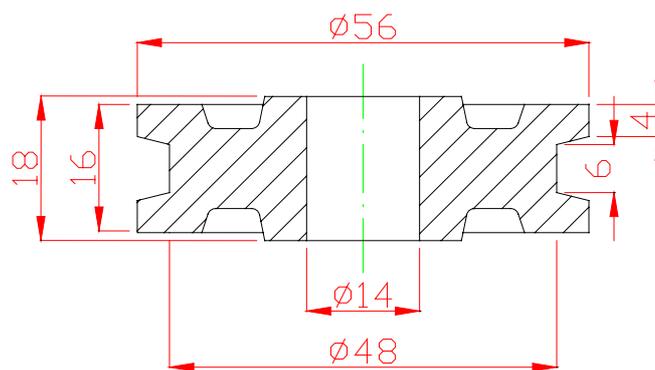


Figura 8. Dimensões da forma final da roda.

Tabela 2. Valores das cargas verticais máximas no processo de simulação física.

Chumbo	Material	Carga Vertical (KN)
	Amostra 1	100
	Amostra 2	115



Figura 9. Disco usinado e peça forjada final de chumbo.



Figura 10. Comparação entre a forma final da roda em alumínio a peça forjada final em chumbo.

4 CONCLUSÃO

Observa-se que as cargas verticais máximas obtidas na simulação física apresentaram concordância com as cargas obtidas na simulação computacional.

Sempre será necessária uma usinagem de acabamento com perda de parte do material da peça forjada, para atingir a forma final da roda. Entretanto se a usinagem for feita a partir das dimensões brutas da peça, como realizado com a peça de alumínio, sem a utilização do processo de forjamento, a retirada do material será muito maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais – Fapemig.

REFERÊNCIAS

- 1 ALTAN T, Industrial Applications of the Manufacturing Processes of Pieces in the Final Shape. In: VII International Conference of Manufacturing Engineering, Tokyo (Japan); November 1996.
- 2 CETLIN, P. R, HELMAN, H.; Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais, FCO, 2003.
- 3 BAXTER Jr, D. F., Cold Forming Steel Parts to Greater Advantage, Part One T, Metal Progress, p. 77-86, 1972.
- 4 BAXTER Jr, D. F., Cold Forming Steel Parts to Greater Advantage, Part Two, Metal Progress, p. 47-60, 1972.
- 5 BAXTER Jr, D. F., Cold Forming Steel Parts to Greater Advantage, Part Three, Metal Progress, p. 59-63, 1972.
- 6 ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR. R.L. The Finite Element Method. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1989. 648p.
- 7 ASHBY M. F., Materials Selection in Mechanical Design. 1st ed. Oxford: Pergamon Press; 1992.
- 8 LEE C. H, KOBAYASHI S., Analyses of Axisymmetric Upsetting and Plane-Strain Side-Pressing of Solid Cylinders by the Finite Element Method. J Eng Ind 1971:445–54.
- 9 KIM H., S., Finite Element Analysis of Deformation Behavior of Metals During Equal Channel Multi-Angular Pressing. Mater Sci Eng., 2002; 328:317–23.
- 10 KOBAYASHI S., HERZOGG R., LAPSLEY J. T., THOMSEM E. G., Theory and Experiment of Press Forging Axisymmetric Parts of Aluminum and Lead, Trans. ASME Journal Eng. Ind, 81, Series B, p. 228-239, 1959.